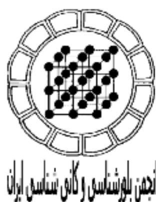
مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

سال بیست و هفتم، شمارهٔ اول، بهار ۹۸، از صفحهٔ ۹۵ تا ۱۰۸



تکوین زمین‌شیمیایی سیال گرمابی کانسار روی-سرب ندوشن با تأکید بر کانه‌نگاری و تجزیه کانی‌های سولفیدی

کامران متولی، مهرداد بهزادی [*]، محمد یزدی

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

(دریافت مقاله: ۹۶/۱۱/۳۰، نسخه نهایی: ۹۷/۴/۲)

چکیده: کانسار روی-سرب ندوشن در مرز غربی کمربند آتشفشانی- نفوذی ارومیه-دختر در نتیجه سیال‌های گرمابی توده‌های گرانیتوییدی در واحدهای آتشفشانی داسیتی تا آندزیتی ائوسن به صورت پرکننده شکستگی‌ها و فضاهای برآمده از عملکرد گسل‌های منطقه پدید آمده است. کانی‌های سولفیدی مهم این کانسار پیریت، اسفالریت، گالن و کالکوپیریت هستند. بررسی ترکیب شیمیایی اسفالریت و پیریت، نشان از دو نوع اسفالریت (کم آهن و نیز نوع آهن بالا دارای واخوردگی کالکوپیریت) و دو نوع پیریت (کم آرسنیک و آرسنیک بالا) دارد، گالن و کالکوپیریت تغییر ترکیب شیمیایی کمتری نشان می‌دهند. این تغییرات بیانگر آن است که روند ترکیب شیمیایی سیال گرمابی که ابتدا از آهن، منگنز، روی و کادمیم غنی بوده (همزمان با تشکیل پیریت و اسفالریت)، با آغاز تمرکز آرسنیک و سرب (همزمان با تشکیل گالن، کالکوپیریت و پیریت آرسنیک بالا) دنبال شده و با افزایش آرسنیک، وانادیم و کبالت پایان یافته است. این امر بیانگر تغییرات محسوس‌تری در مراحل آغازین کانه‌زایی در زمین‌شیمی سیال گرمابی است. ترکیب شیمیایی اسفالریت‌ها و مقایسه آن‌ها با اسفالریت‌های کانسارهای گرمابی و اسکارنی ژاپن خاستگاه رگه‌ای گرمابی (سولفید بالا) ناشی از توده گرانیتوییدی (نوع مگنتیتی) را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: *ریز کانی نگاری؛ اسفالریت؛ روی-سرب گرمابی؛ ندوشن؛ ایران مرکزی.*

مقدمه

وجود معادن قدیمی سرب و روی در ایران نشان از پتانسیل معدنی در پهنه ساختاری ارومیه دختر [۱، ۲] برای این دو فلز دارد، افزون بر وجود معادنی مانند معدن مهدی آباد با ذخیره غیرسولفیدی کالامین [۳، ۴] در استان یزد، می‌توان از کانسار ندوشن نام برد. وجود کنده کاری قدیمی و نیز وجود سرباره در پنج کیلومتری کانسار روی-سرب ندوشن [۵]، زمینه‌ساز فعالیت‌های اکتشافی بیشتر و حفاری به منظور شناخت وضعیت کانی‌سازی و تعیین عیار و ذخیره آن شده است. انجام حفاری در دو مرحله (تا ژرفای ۶۵ و سپس ۲۲۰ متری) سرانجام به کشف ۳۵۰ هزار تن ذخیره با عیار مجموع ۵/۴٪ روی و سرب و ۱/۷۶ ppm طلا انجامید [۶، ۷]. بررسی کانی‌شناسی نمونه‌های صیقلی و بافت کانه‌ها، بررسی شدت واخوردگی‌های کالکوپیریت در اسفالریت، مقایسه فراوانی این واخوردگی‌ها و ارتباط آنها با ترکیب شیمیایی نمونه‌ها و بررسی تغییر ترکیب شیمیایی کانی‌ها به روش ریزکاوی با پرتوی X (XPMA) از جمله کارهایی بوده است که به منظور واکاوی تاریخچه فرآیندهای زمین‌شناسی و کانی‌سازی در این کانسار در نظر گرفته شده است.

روش بررسی

پس از گردآوری اطلاعات، بررسی‌های دورسنجی، بازدید از منطقه و برداشت نمونه به همراه سنگ‌شناسی صحرایی و برداشت عوارض ساختاری، تعداد ۲۰ نمونه سطحی جهت تهیه مقطع نازک و نازک صیقلی انتخاب شدند. با توجه به گسترش

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۲۱۲۹۹۰۲۶۴۲، نمابر: ۰۲۱۲۲۴۳۱۶۹۰، پست الکترونیکی: M-behzadi@sbu.ac.ir

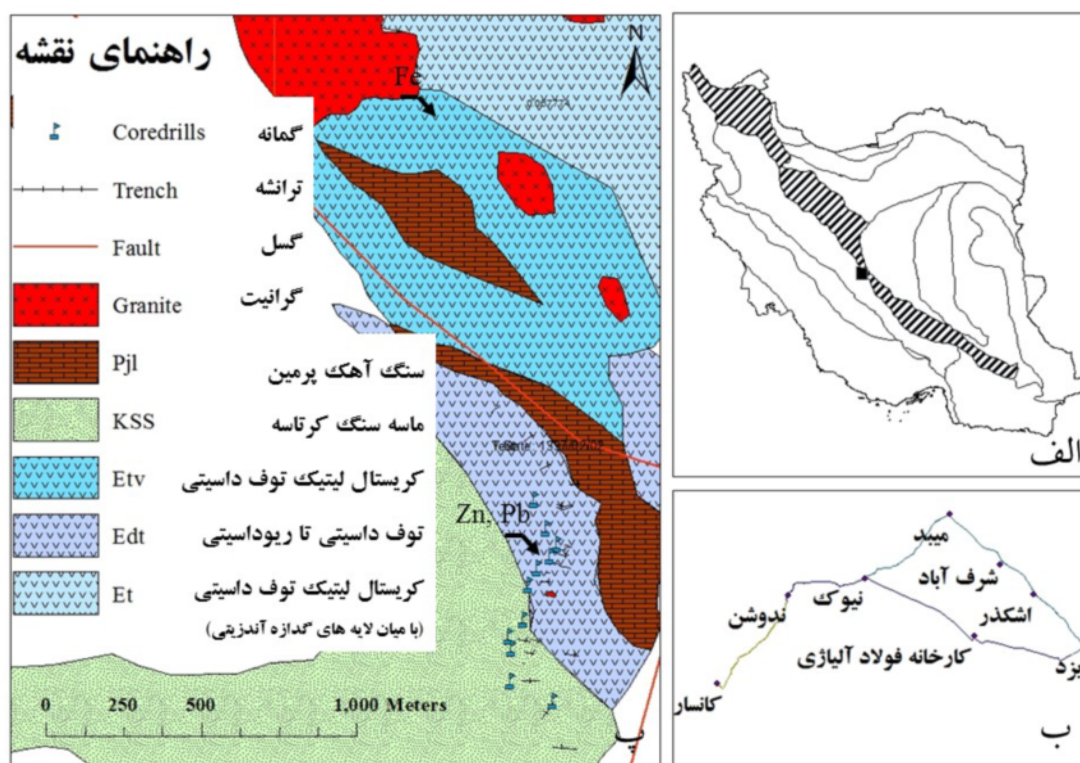
[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.95]

پهنه اکسایشی در بخش‌های سطحی، نمونه‌های زیرسطحی برای شناسایی ترکیب کانی‌شناسی و بافتی مورد بررسی بیشتر قرار گرفتند. تعداد ۱۴۱ نمونه مقطع نازک و ۱۴۴ نمونه مقطع صیقلی از ۱۱ گمانه به دقت بررسی سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری شدند. افزون بر این، براساس طیف‌سنجی پلاسمای جفت شده القایی (ICP) نمونه‌ها، پنج نمونه صیقلی دارای اسفالریت با بیشترین واخوردگی کالکوپیریت و دو نمونه دارای بیشترین مقدار طلا و نقره انتخاب شدند. این نمونه‌ها برای تعیین ترکیب شیمیایی ۷۲ نقطه بر اسفالریت، پیریت، گالن، کالکوپیریت و کوارتز به روش XPMA با دستگاه پرتوی X مدل XGT-7200 Horiba در شرکت کانساران بینالود به روش بررسی شدند.

بحث و بررسی

زمین‌شناسی عمومی

کانسار ندوشن در ۱۰۰ کیلومتری غرب شهر یزد و در ۳۳ کیلومتری جنوب غربی شهرستان ندوشن جای دارد. منطقه مورد بررسی در اصل از واحدهای آتشفشانی ائوسن به همراه توده‌های نفوذی جوانتر نفوذ کرده در این مجموعه تشکیل شده است (شکل‌های ۱ الف و ب) [۸-۱۰] حال آنکه نفوذ دو توده در هم در این منطقه گزارش شده است [۱۱]. واحدهای آتشفشانی رخنموده در بخش شرقی برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کفه تاقستان، واحدهای آتشفشانی داسیتی-آندزیتی ائوسن است که توده‌های گرانیتوئیدی الیگوسن در یک گستره زمانی کوتاه نزدیک به ۴۶۰ هزار سال [۱۲] در این مجموعه نفوذ کرده و موجب پیدایش کانی‌سازی‌ها شده است (شکل ۱ پ) [۸]. افزون بر اینکه ترکیب شیمیایی سنگ-شناسی توده‌های نفوذی، وابستگی آنها را به فعالیت ماگمایی کرانه قاره‌ای تأیید می‌کند [۸،۱۳]، سنگ‌های آتشفشانی بیشتر پورفیری [۱۴] و آهکی قلیایی پتاسیم بالا [۱۵] نیز اشاره به مجموعه‌های زمین‌ساختی کمان ماگمایی دارد [۱۶]. وجود چنین شرایطی منجر به تشکیل کانی‌سازی‌های فلزی مانند آهن سورک [۱۷]، آهن ندوشن [۱۸]، آهن محمدآباد [۱۹] و چند فلزی ندوشن شده است. نفوذ این توده‌ها گاه فقط با دگرسانی‌های رسی گسترده همراه است (مانند کانسار رسی ندوشن) [۲۰].



شکل ۱ الف) جایگاه منطقه مورد بررسی بر کمربند ارومیه-دختر ایران، ب) موقعیت کانسار نسبت به شهرهای پیرامون و مرکز استان (یزد) پ) مکان و موقعیت پیجوییها بر نقشه زمین شناسی گستره مورد بررسی.

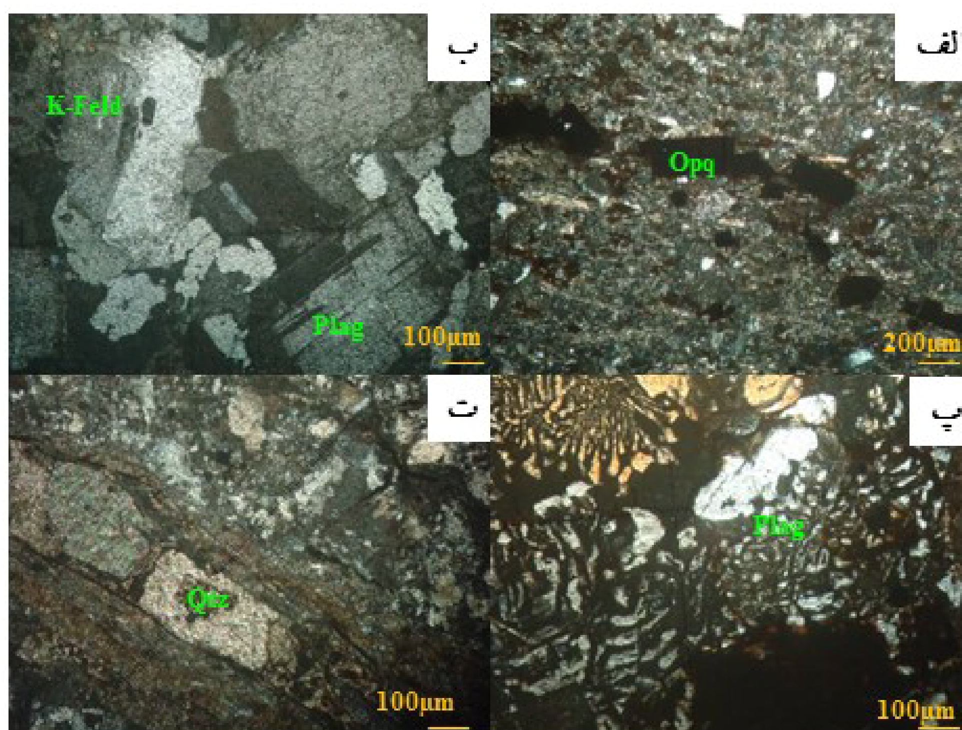
[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.95]

از مهمترین پدیده‌های ساختاری منطقه می‌توان به گسل راستالغز راستگرد دهشیر اشاره کرد [۸] که با طول ۳۵۰ کیلومتر، نهشته‌های کواترنری را قطع می‌کند [۲۱]. این گسل که از ۱۷ کیلومتری شمال شرقی کانسار عبور می‌کند، در نتیجه گسل‌های فرعی خود نقش بسزایی در زمین‌ساخت منطقه داشته است [۸]. بررسی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کفه تاقستان، تصاویر ماهواره‌ای نشان از سیستم‌های گسل و شکستگی با سازوکار تراکششی دارند که نشان‌دهنده پدیده‌های ساختاری تمرکز ماده معدنی در این کانسار هستند و پیشتر نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند [۶، ۷].

سنگ‌نگاری و سنگ‌شناسی واحدهای گستره کانسار

بیشتر واحدهای رخنمون یافته در گستره کانسار ندوشن، واحدهای آتشفشانی ائوسن خاکستری تا سبزرنگ هستند. پدیده‌های ساختاری و عملکرد گسل دهشیر-بافت و گسل‌های فرعی برآمده از آنها نقش مهمی در گسترش شکستگی‌ها و گسل‌های فرعی و دگریختی‌های پدید آمده این واحد در منطقه دارند. این واحد در مقاطع نازک به طور کلی ریزبلور است و بافت‌های گوناگون از توف شیشه‌ای، توف پورفیری تا توف آواری را نشان می‌دهد. سیال‌های گرمابی ناشی از نفوذ توده گرانیتوئیدی موجب تشکیل رگه‌های دارای کانی‌های تیره (شکل ۲ الف) شده است. ترکیب سنگ‌های آتشفشانی و توف‌ها داسیتی تا آندزیتی بوده و فلدسپارهای پلاژیوکلاز فراوانترین بلورهای این نمونه‌ها هستند. فلدسپارهای پتاسیمی، کانی‌های کدر و فرومنیزین، از جمله هورنبلاند و به مقدار کمتر پیروکسن از دیگر کانی‌های مشاهده شده در این واحد سنگی هستند.

از واحدهای رسوبی رخنمون یافته در منطقه می‌توان به واحد آهکی (پرمین؟ [۸]) که به موازات گسل تقریباً شمال غربی-جنوب شرقی بر واحدهای دیگر رانده شده است اشاره کرد. بخش دیگر واحد آهکی به سن ائوسن در منطقه مورد بررسی به صورت رخنمونی فسیل‌دار در مرکز کانسار دیده می‌شود [۶]. این دو واحد به دلیل واکنش‌پذیری بیشتر، در برخی موارد فرآیندهای دگرسانی و جانشینی را به خوبی به نمایش می‌گذارند.



شکل ۲ تصویر میکروسکوپی چهار نمونه در منطقه مورد بررسی: الف) بلور شیشه‌ای توف با بلورهای ریز پلاژیوکلاز و کانی های خودشکل کدر رونددار (5X, XPL). ب) سنگ‌روشن با بلورهای درشت پلاژیوکلاز و فلدسپار پتاسیم و کوارتز (10X, XPL) پ) کوارتز دیوریت با بافت میرمکیتی کوارتز و پلاژیوکلاز (10X, XPL). ت) نمایی از رگه کوارتز با کربنات تأخیری همراه و دگرسانی در زمینه سنگ‌های آتشفشانی و توفی در مقطع نازک (10X, XPL). واضح نبودن تصویر نشان از دگرسانی‌های همراه با رگه دارد که در بخش‌هایی با کانی‌سازی همراه بوده است. (فلدسپار پتاسیم = K-Feld، پلاژیوکلاز = Plag، کوارتز = Qtz و کانی‌های کدر= Opq).

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.95]

یکی دیگر از واحدهای منطقه توده گرانیتوئیدی است که رخنمونی کوچک در منطقه مورد بررسی دارد، اما در شمال و در گستره کانسار آهن اسکارنی رخنمون بزرگتری از آن را می‌توان دید. این توده گرانیتوییدی (شکل ۲ ب) گاه توسط رگه‌های کوارتز-تورمالین قطع شده است [۸]. سه رخنمون در گستره کانسار عبارتند از ۱) توده گرانیتوییدی بسیار کوچک در بخش میانی، ۲) بخش کوچکی به موازات آن در شرق تپه آهکی با بافت‌های میرمکیتی در توده دیوریتی که نشان دهنده مقدار آب زیاد است (شکل ۲ پ) و ۳) رخنمون شمالی با ترکیب گرانودیوریتی تا دیوریتی. نفوذ این توده‌ها در مجموعه سنگ‌های منطقه باعث ایجاد پدیده‌های اسکارنی در شمال و دگرسانی (رسی و پروپیلیتی)، کانی‌سازی پرکننده شکستگی‌ها و جانشینی در بخش کانسار گرمابی شده است. گسترش رگه‌های کوارتز (شکل ۲ ت) گاه با سیال‌های تأخیری غنی از کربنات را به دنبال داشته است. ادامه تنش منجر به پدیده‌های سنگ‌بافتی چون سابگرینینگ در بلورهای کوارتز شده است.

کانی‌سازی در کانسار ندوشن

سنگ‌های آتشفشانی و توف، سنگ میزبان کانی‌سازی در کانسار ندوشن هستند که فعالیت‌های زمین‌ساختی و گسترش شکستگی‌ها در آن به همراه جریان سیال‌های گرمابی منجر به شکل‌گیری کانی‌سازی رگه‌ای، رگچه‌ای و پرکننده فضاهای خالی شده است. بخش ناچیزی از کانه‌های این کانسار در فسیل‌های واحد آهک ائوسن به طور بخشی یا کامل در نتیجه عملکرد سیال‌های گرمابی جایگزین شده‌اند (شکل‌های ۳ الف و ب). کانی‌سازی آهن در شمال کانسار [۱۸] گسترشی در گستره چند فلزی ندارد، اما کانی‌های شاخصی چون گارنت (آندرادیت) و اپیدوت بدون تراکم سرب و روی در بخش شمالی کانسار چندفلزی به سوی کانسار آهن دیده شده است. کانی‌سازی رگه‌ای (همراه با دگرسانی‌های رسی، پروپیلیتی و سیلیسی) از گسل تقریباً شمال غربی-جنوب شرقی منطقه پیروی می‌کند. کانی‌های ایلیت، کائولینیت، مونت موریونیت، کلریت، اپیدوت از جمله کانی‌های شناسایی شده در نتایج پراش پرتوی X (XRD) بوده است (شکل ۴) [۷] که نشان دهنده شرایط اکسایشی است.

کانی‌شناسی شامل مجموعه‌ای از کانی‌های اولیه بیشتر سولفیدی و کانی‌های ثانویه است. کانی‌های اولیه شامل پیریت، اسفالریت، گالن، کالکوپیریت (شکل ۳)، مگنتیت و کانی‌های ثانویه کوولیت، دیژنیت، کالکوسیت و بورنیت است. شرایط سطحی به واسطه سیستم‌های شکستگی، کانی‌های سولفیدی را به انواعی از کانی‌های اکسیدی و کربناتی از جمله سروزیت، مالاکیت، انگلزیت، همی مورفیت، گوتیت و لیمونیت تبدیل کرده است.

کانی اسفالریت کم و بیش دارای بیماری کالکوپیریت در نتیجه واخوردگی برآمده از شوک‌های گرمایی یا فرآیندهای دگریختی [۲۲] اغلب در انواع آهن بالاست [۲۳]. کانسار از زمان تشکیل پیوسته دستخوش دگریختی بوده است.

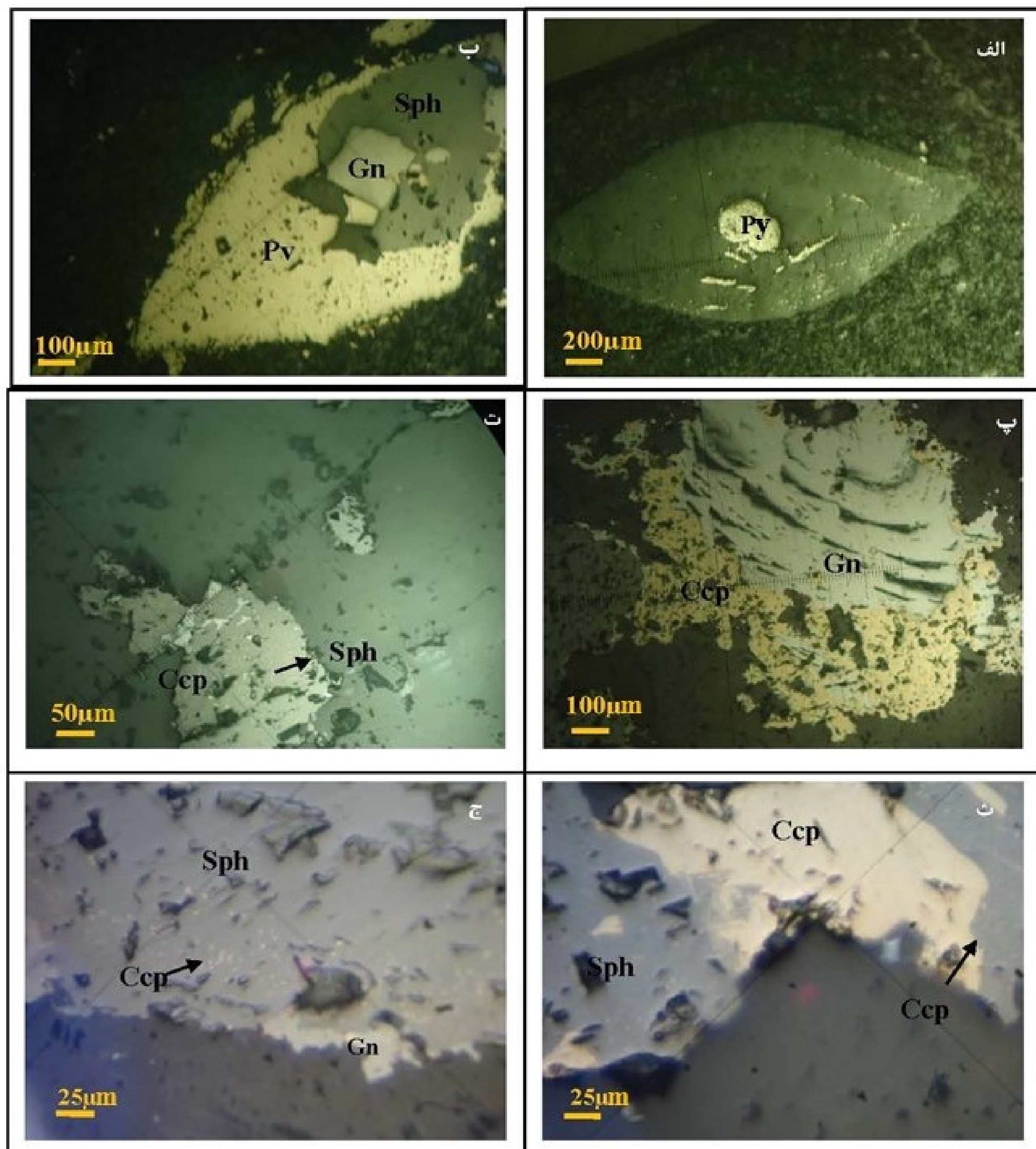
بررسی مقاطع صیقلی

در بررسی مقاطع میکروسکوپی، کانی‌سازی بیشتر به صورت پیریت، اسفالریت، گالن و کالکوپیریت دیده شده و دگریختی سطوح رخی را در کانی‌های شکل پذیرتر مانند گالن خمیده کرده است (شکل ۳ پ). بررسی مقاطع صیقلی نشان داد که بیشتر اسفالریت‌های منطقه دارای میانبارهای کالکوپیریت هستند. واخوردگی میانبار کالکوپیریت درون اسفالریت، در شرایط گرمابی با دمای بیش از $200^{\circ}C$ و مقدار آهن بالا پدیده‌ای متداول است [۲۳] و نرخ سرد شدن و دگریختی از عوامل موثر در بروز فرآیند واخوردگی هستند [۲۲]. بنابراین، مقدار آهن اسفالریت نقش مهمی در این میان دارد. کانسار چندفلزی ندوشن به دلیل نزدیکی به کانسار اسکارنی ندوشن از امتیاز بالاتر بودن مقدار آهن محیط (میانگین ۳٪ و بیشترین مقدار ۳۱٪) برخوردار است و مهمترین عامل در پدیده واخوردگی کالکوپیریت در اسفالریت به شمار می‌آید.

بررسی کانه‌های اصلی کانسار ندوشن، نشان از تشکیل تأخیری گالن و کالکوپیریت نسبت به اسفالریت هم به صورت رگچه‌های گالن قطع کننده اسفالریت و هم به صورت میانبارهای واخوردگی کالکوپیریت در اسفالریت دارد (شکل‌های ۳ ت، ث و ج). توالی همبرزایی در شکل ۵ توالی کانی‌سازی کانسار را نشان می‌دهد. چگونگی واخوردگی کالکوپیریت در اسفالریت هم از نظر ابعاد گویچه‌های واخورده و هم از نظر تراکم می‌تواند نشان‌دهنده مقدار مس و آهن موجود در اسفالریت باشد. اندازه میانبارهای واخوردگی در گستره ۱ تا ۲۰ میکرون (بیشتر ۱ تا ۵ میکرون) متغیر است. بررسی آماری مقاطع میکروسکوپی تراکم ۱ تا ۸۰ میانبار در مساحت ۴۰×۴۰ میکرون مربع را نشان داده است. بطور کلی اندازه و تعداد میانبارها نسبت معکوس با هم دارند. شکل این میانبارها متفاوت (گویچه‌ای، نیمه شکل‌دار، کشیده یا سوزنی) است که یا به طور منفرد یا به طور دسته‌ای و وابسته به هم دیده می-

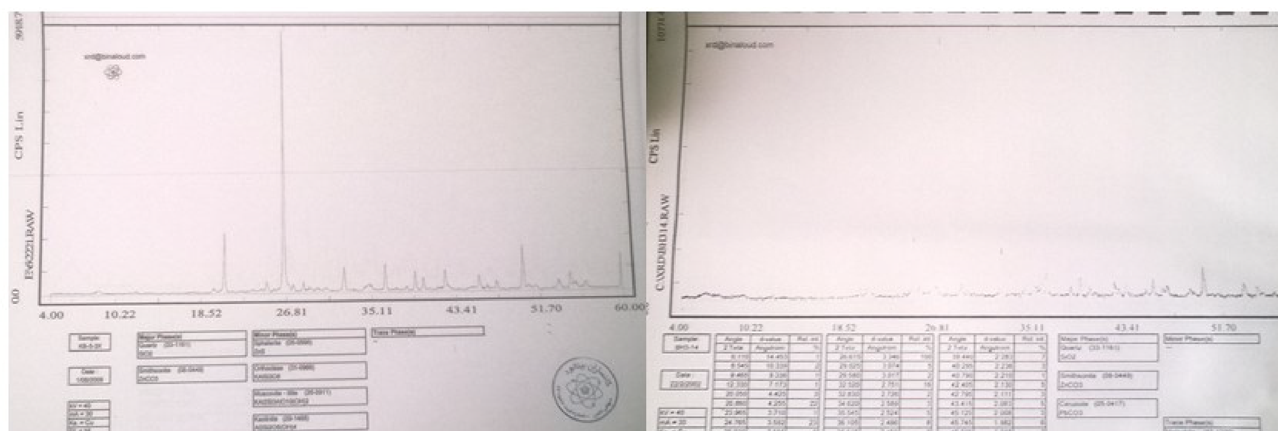
[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.95]

شوند. میانبارهای مشاهده شده در اسفالریت‌هایی که رگچه تأخیری گالن آنها را قطع کرده است، شکل‌های متفاوتی را نشان می‌دهند. در نمونه‌های با میانبار تا حدود ۱ میکرون، تراکم میانبارها همبستگی خوبی با مقادیر سرب نشان می‌دهند. این امر نشان از نقش سیال‌های گرمابی تأخیری سرب و مس-دار در ایجاد آغشتگی سرب در محیط و ایجاد شوک گرمایی باشد تا واخوردگی کالکوپیریت در اسفالریت را تسهیل کند.



شکل ۳ شش مقطع صیقلی در نور بازتابی: الف) جانشینی بخشی پیریت در مرکز فسیل (نوموليت) به موازات خطوط رشدی آن (PPL,10X)، ب) جانشینی کامل اسفالریت و گالن در فسیل (نوموليت) (PPL,10X)، پ) دگریختی در رخ‌های مثلثی گالن که به صورت خطوط خمیده دیده می-شود (PPL,10X)، ت) واخوردگی کالکوپیریت در اسفالریت (PPL,20X) ث) واخوردگی کالکوپیریت در اسفالریت در لبه بلور و در کنار گالن (PPL,40X) و ج) میانبارهای واخوردگی گویچه‌ای شکل کالکوپیریت در اسفالریت (PPL,40X) (پیریت = Py، اسفالریت = Sph، گالن = Gn، کالکوپیریت = Ccp).

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.95]



شکل ۴ نتایج XRD دو نمونه از کانسار چندفلزی ندوشن: الف) دارای کانی های کوارتز، اسمیت زونیت، سروزیت و مالاکیت و ب) دارای کانی های کوارتز، اسمیت زونیت، اسفالریت، مسکویت، کائولینیت، ارتوکلاز.

Stage	I Disseminated	II Skarn	III Hydrothermal	IV Supergene
Pyrite	◆	◆	◆	
Magnetite		◆		
Sphalerite			◆	
Galena			◆	
Chalcopyrite			◆	
Hematite			◆	
Bornite			◆	◆
Chalcocite			◆	◆
Digenite				◆
Covellite				◆
Malachite				◆
Azurite				◆
Hemimorphite				◆
Cerussite				◆
Anglesite				◆
Fe-hydroxides				◆

شکل ۵ توالی همبرزایی کانسار چندفلزی ندوشن (مستطیل متقاطع نشان دهنده جانشینی در فسیل است).

بررسی مقاطع صیقلی نمونه‌های با ژرفای حدود ۴۰ متر نشان می‌دهد که با افزایش مقدار سرب از ۸۱ppm به ۹۳ppm و ۱۲۲ppm، تراکم میانبارهای یک میکرونی کالکوپیریت در مساحت ۴۰×۴۰ میکرون مربع از ۱۱ به ۳۵ و ۶۵ عدد افزایش می‌یابد. حتی در نمونه‌های با میانبارهای کمی درشت‌تر، شرایط تقریباً مشابهی برقرار است و می‌توان همان قانون تناسب مقدار سرب با تعداد میانبارها را تعمیم داد. در دو نمونه دیگر با مقدار سرب ۲۲۳۰ppm و ۷۵۵ppm، تراکم شمار میانبارها به ترتیب ۴۰ تا ۴۵ و ۲۰ تا ۲۸ در همین مساحت بوده است. بررسی انجام شده بر این میانبارها نشان می‌دهد که پدیده واخوردگی در لبه دانه‌های اسفالریت (به دلیل مقاومت کمتر در برابر شوک گرمایی سیال‌های گرمابی) یا در میانه اسفالریت با رگچه تأخیری متقاطع از جنس گالن بهتر دیده می‌شود. این قوانین ساده تجربی را به دلیل پیچیدگی شرایط تشکیل نمی‌توان به سادگی به اندازه میانبارهای با اندازه ۲ میکرون و بزرگتر تعمیم داد.

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.95]

بررسی ریزکانی‌شناسی

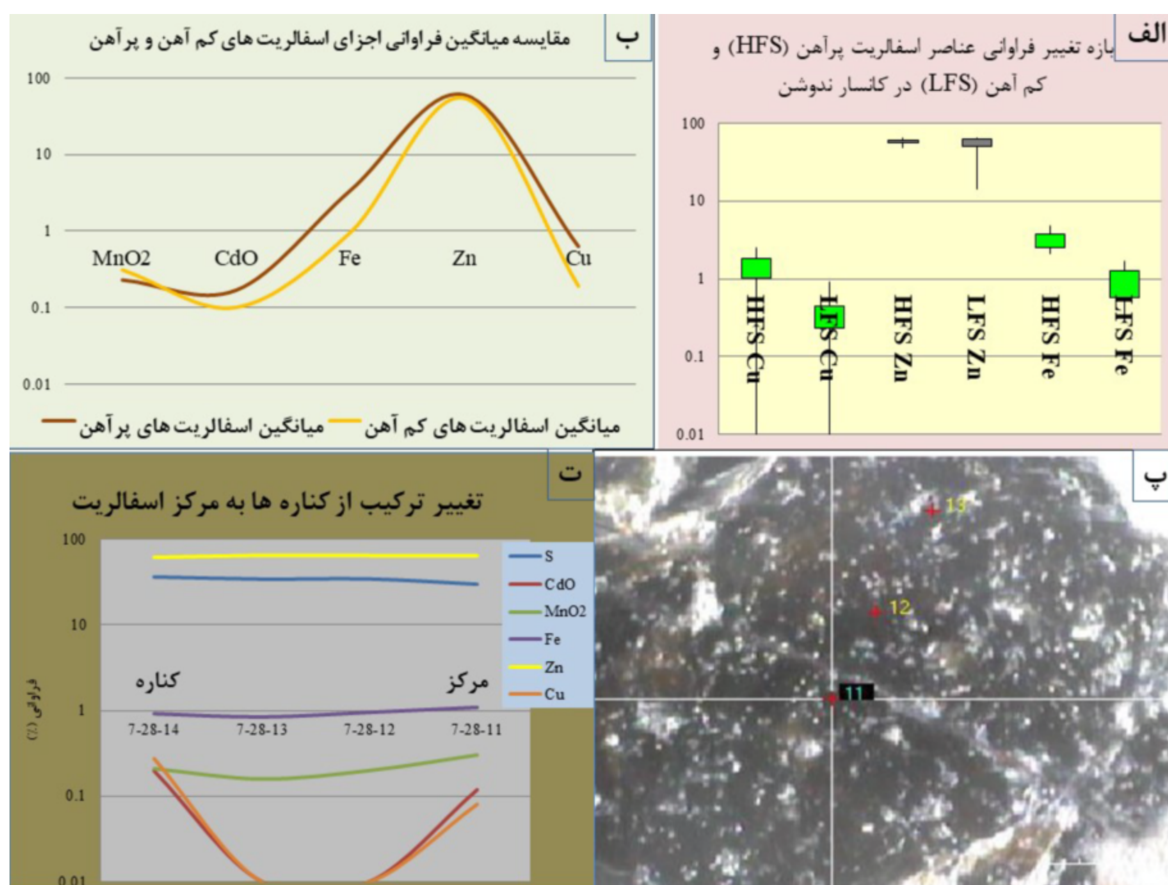
اسفالریت: اسفالریت بهترین میزبان کادمیم، ژرمانیم، گالیم، ایندیم و منگنز است [۲۴]. بررسی‌های انجام شده بر نمونه‌های اسفالریت نشان از آهن کمتر در نمونه‌های نوع دره می‌سی‌سی‌پی (حدود ۱٪ و کمتر) نسبت به نمونه‌های رگه‌ای و توده‌ای سولفید (حدود۵٪) دارد [۲۵]. نسبت روی به گوگرد در ورتزیت بیشتر اما در اسفالریت کمتر است [۲۶].

نتایج تجزیه اسفالریت (جدول ۱) نشان می‌دهد که افزون بر روی و گوگرد (اجزای اصلی اسفالریت)، عناصر آهن، کادمیم، منگنز و مس تقریباً در همه نقاط آن دیده می‌شوند. نتایج تجزیه نمونه‌های اسفالریت دو نوع پرآهن (بیش از ۲٫۱٪) و کم آهن (کمتر از ۱٫۷٪) ویژگی‌های زمین‌شیمیایی متفاوتی را نشان می‌دهد (شکل ۶). در اسفالریت‌های پر آهن، مقدار مس و تا حدی روی بیشتر از انواع کم آهن است. گذشته از این، انواع پرآهن اسفالریت‌ها میانگین کادمیم بیشتر اما اکسید منگنز کمتری نسبت به انواع کم آهن دارند. همراهی مس بیشتر با مقدار آهن بالاتر (تا ۴٫۸۵٪) زمینه‌ساز رخداد بیماری کالکوپیریت و نشان دهنده نقش سیال‌های گرمابی سیستم‌های فراگرمایی در تشکیل آنهاست. باوجود یک گستره وقفه در مقدار آهن اسفالریت‌های پرآهن و کم آهن، انواع پرآهن منطقه مورد بررسی آهن کمتری (حدود ۲٪) نسبت به اسفالریت‌های پرآهن دیگر مناطق دنیا (حدود ۵٪) دارند. با توجه به تبلور دیوریت‌های منطقه در ۳۰٫۵۲ میلیون سال پیش و گرانیت‌های منطقه در ۳۰٫۰۶ میلیون سال پیش [۲۷]، شاید بتوان مقدار کمتر آهن کانسار چندفلزی ندوشن را نتیجه کانی‌سازی آهن پیشزاد شمال کانسار چندفلزی و تخلیه بار آهن سیال‌ها دانست که میانگین مقدار آهن سیال این سامانه کانه‌زایی را کاهش داده و آهن کمتری را برای کانی‌های اسفالریت بر جای گذاشته است. اما وجود همین فزونی نسبی آهن در برخی از اسفالریت‌ها به همراه مقدار مس، برای رخداد بیماری کالکوپیریت کافی بوده است. بررسی تغییر ترکیب شیمیایی از مرکز به کناره اسفالریت نشان می‌دهد که به سمت کناره‌های بلور مقدار روی کاهش و مقدار گوگرد افزایش می‌یابد. مقدار مس و کادمیم روند مشخص و ثابتی از خود نشان نمی‌دهند اما بطور کلی می‌توان گفت که به سوی کناره‌های بلور مقدار کادمیم از مقدار مس پیشی می‌گیرد.

جدول ۱ نتیجه تجزیه چند نقطه بر اسفالریت به روش XPMA.

اسفالریت	S	Zn	Cu	CdO	Pb	MnO_2	Fe	CoO
۱-۱۶-۷	۲۸٫۸۷	۶۰٫۱۸	۰٫۹۱	۰٫۳۳		۰٫۱۲	۱٫۷۱	
۲-۱۶-۷	۳۵٫۶۵	۶۲٫۹۴	۰٫۴۳	۰٫۲۳	۰٫۲۲	۰٫۲۴	۲٫۵۹	
۳-۱۶-۷	۳۳٫۸۷	۵۸٫۶۳	۱٫۳۲			۰٫۲	۴٫۴۹	
۴-۱۶-۷	۳۵٫۰۹	۴۹٫۸۵				۰٫۲۱	۰٫۷۶	
۱۱-۲۸-۷	۳۰٫۱۱	۶۲٫۵۱				۰٫۱۴	۱٫۵۶	
۱۲-۲۸-۷	۳۴٫۸۵	۵۹٫۹۴	۱٫۸۲			۰٫۲۱	۴٫۰۸	
۱۳-۲۸-۷	۳۴٫۶۹	۶۱٫۶	۰٫۲۷	۰٫۲۱		۰٫۲۱	۰٫۹۲	
۱۴-۲۸-۷	۳۶٫۸۱	۶۰٫۵۹	۰٫۲۳	۰٫۲		۲٫۸	۰٫۷۴	
۱-۱۱-۸	۳۳٫۷۴	۵۶٫۷۶	۱٫۱۱	۰٫۵۳		۰٫۲	۴٫۲۲	
۲-۱۱-۸	۳۲٫۷۹	۶۲٫۴۵	۱٫۲۱		۰٫۰۲	۰٫۱۸	۲٫۲	
۳-۱۱-۸	۲۹٫۰۱	۶۱٫۱۳	۰٫۵	۰٫۲۷		۰٫۱۳	۱٫۶۹	۰٫۶۸
۴-۱۱-۸	۲۸٫۵۸	۶۱٫۱۹	۰٫۴۵	۰٫۲۴		۰٫۱۲	۰٫۸۵	۰٫۰۵
۵-۱۱-۸	۳۶٫۳۳	۵۷٫۴۱	۰٫۶۹	۰٫۳۱		۰٫۲۶	۴٫۳۹	
۶-۱۱-۸	۳۵٫۵۷	۶۱٫۸۲	۰٫۰۷	۰٫۱		۰٫۲۳	۱٫۱۶	

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.95]

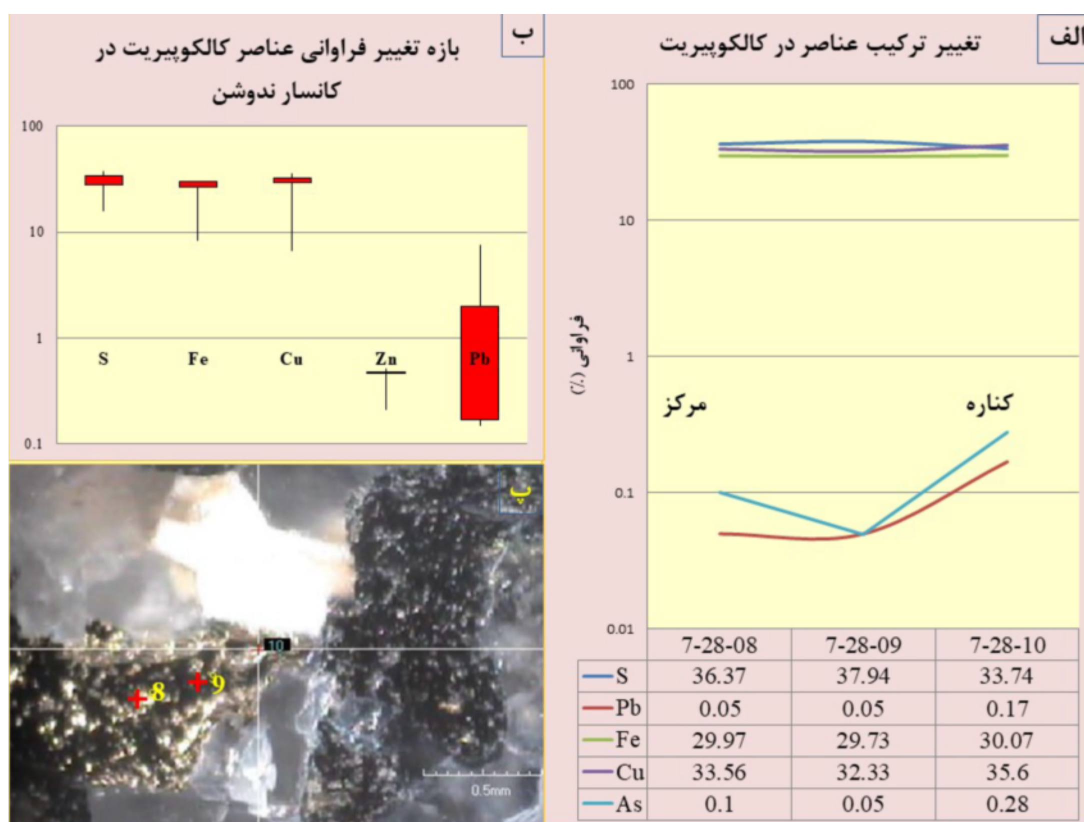


شکل ۶ الف) گستره تغییرات برخی عناصر در اسفالریت کم آهن (LFS) و پرآهن (HFS)، ب). مقایسه میانگین برخی عناصر در اسفالریت‌های کم آهن و پرآهن، پ) تصویر نقاط تجزیه شده بر یک اسفالریت کم آهن و ت) نمایش تغییرات عناصر آن.

بررسی جامعی که بر اسفالریت‌های کانسارهای رگه‌ای و اسکارن ژاپن انجام شد، نشان داد که اسفالریت‌های با درصدمولی پیریت کمتر از ۱۲٪، در کانسارهای رگه‌ای وابسته به گرانیتوییدهای سری مگنتیت یافت می‌شود و مقدار بیش از ۱۴٪ با انواع ایلمنیتی همراه است [۲۸]. بیشترین مقدار مول پیریتی محاسبه شده (۸/۵٪) نشان از یک ماگمای گرانیتوییدی نوع مگنتیتی دارد. گوگرد، کلر و فلز فراوان سری مگنتیت نسبت به سری ایلمنیت امکان انتقال فلزاتی چون روی، طلا، منگنز، نقره و جیوه بصورت ترکیبات پیچیده کلروری انباشته در ماگماهای سری مگنتیت را فراهم می‌کند [۲۹]. توده‌های گرانیتوییدی منطقه مورد بررسی براساس نوع کانی‌سازی‌های مشاهده شده از نوع مگنتیتی بوده، وجود هماتیت، پیریت و اپیدوت و نبود گرافیت [۳۰] نشانگر کانی‌سازی همراه با گرانیتوییدهای مگنتیتی است.

کالکوپیریت: وجود مولیبدن به ویژه در دمای بالا و نیز نیکل، کبالت، روی، قلع در نمونه‌های کالکوپیریت گزارش شده است [۲۴،۲۲]. در این پژوهش افزون بر عناصر اصلی تشکیل دهنده کالکوپیریت، هیچ یک از عناصر یاد شده بجز روی یافت نشد و نتایج تجزیه نشان از وجود سرب، روی، آرسنیک و منگنز دارد (شکل ۷). عناصر اصلی سازنده کالکوپیریت مقادیر تقریباً ثابتی نشان می‌دهند (با افزایش نسبی مس و کاهش نسبی گوگرد از مرکز به کناره)، اما بطور کلی مقدار سرب و آرسنیک به سمت کناره فزونی می‌یابد (جدول ۲). در نمونه‌های کالکوپیریت، بطور کلی وجود روی با سرب همراه است. بررسی دقیق‌تر مقادیر عناصر، آهن و مس همروندی آشکار با آرسنیک و ناهمروندی با گوگرد را نشان می‌دهند. چنین پدیده‌ای نشان از افزایش فزاینده نقش آرسنیک در سیال‌های گرمابی و کاهش گوگرد در آنها دارد. مصرف بخش عمده‌ای از گوگرد برای تشکیل اسفالریت و تا حدی گالن داشته و با کاهش مقدار گوگرد سیال گرمابی عرصه برای آرسنیک در این سیال باز شده است.

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.95]



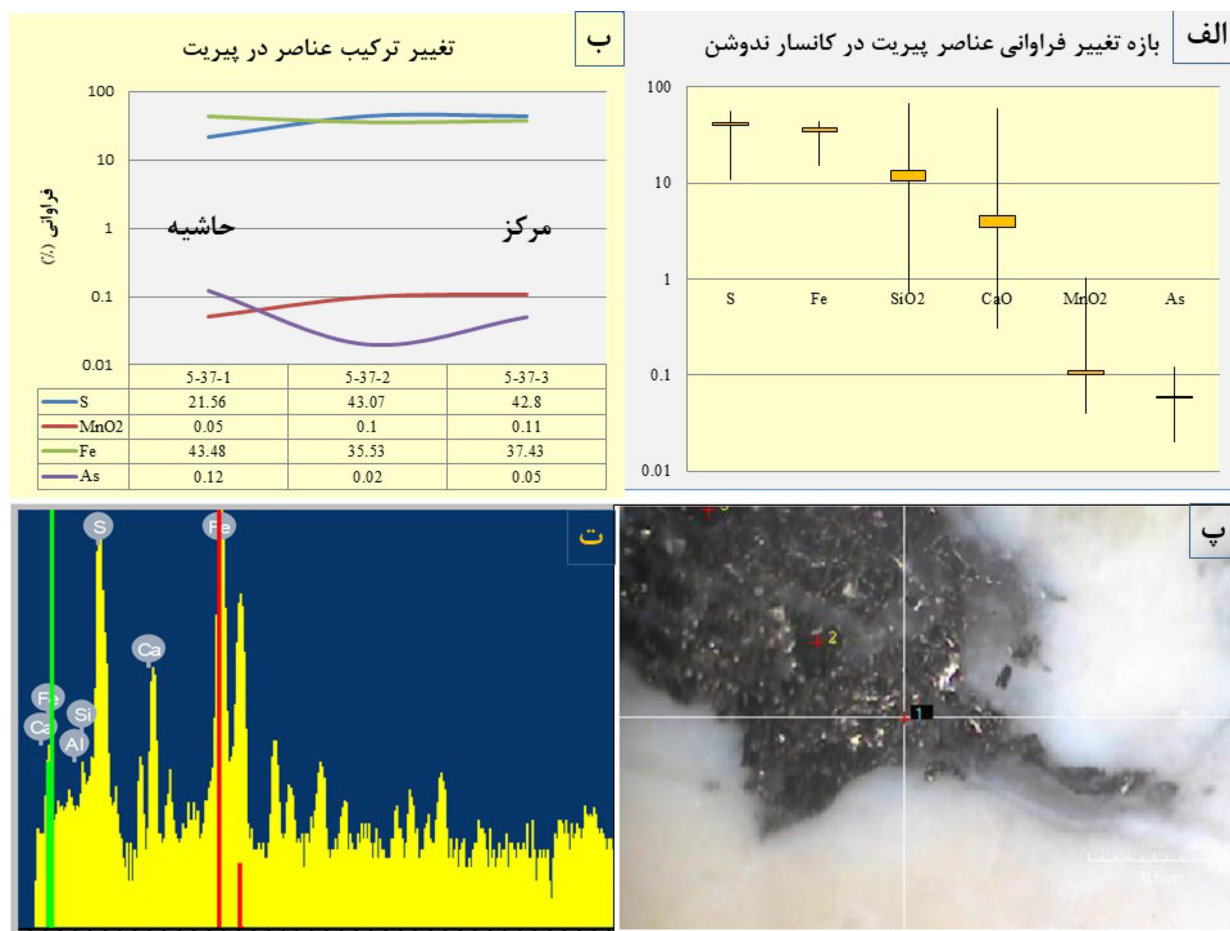
شکل ۷ الف) تغییرات مرکز به کناره در کالکوپیریت، ب) گستره فراوانی عناصر موجود در یکی از نمونه های کالکوپیریت و پ) جایگاه برخی نقاط تجزیه شده بر آن.

جدول ۲ نتیجه تجزیه چند نقطه بر کالکوپیریت به روش XPMA.

کالکوپیریت	S	Fe	Cu	Pb	As
۷-۲۸-۸	۳۶٫۳۷	۲۹٫۹۷	۳۳٫۵۶		۰٫۱
۷-۲۸-۹	۳۷٫۹۴	۲۹٫۷۳	۳۲٫۳۳		
۷-۲۸-۱۰	۳۳٫۷۴	۳۰٫۰۷	۳۵٫۶	۰٫۱۷	۰٫۲۸

پیریت: این کانی می‌تواند نیکل، کبالت، روی، آرسنیک، سلنیم، نقره و طلا را در ترکیب خود داشته باشد [۲۴، ۲۶] اما در کانسار ندوشن به جز آهن و گوگرد، که بنیان اصلی پیریت است، فقط عناصر منگنز و آرسنیک در نتایج تجزیه آشکار شده‌اند (شکل ۸). بررسی ترکیب پیریت (جدول ۳) نشان از دو نوع پیریت یکی کم آرسنیک با مقدار ثابت کمتر از ۰٫۰۶٪ و دیگری با مقداری آرسنیک بیش از ۰٫۱۱٪ داشته است. نتایج XPMA رگچه پیریت دار (با مقدار طلای بیش از 1ppm در نتایج ICP)، طلا را آشکار نساخت، اما مقدار آرسنیک آنها دو برابر سایر نمونه‌های پیریت و حدود ۰٫۱۱ تا ۰٫۱۲ درصد بوده است. این تفاوت آشکار دو برابری در مقدار آرسنیک، گویای دو نسل پیریت یکی سیال گرمابی کم آرسنیک (و احتمالاً پرگوگرد) در یک مرحله و دیگری هنگام غنی بودن سیال گرمابی از آرسنیک (احتمالاً همراه با کاهش مقدار گوگرد) بوده است. بررسی‌های میکروسکوپی نیز نشان از دو نوع پیریت یکی رگه‌های ستبر و خرد شده پیریت و دیگری رگه‌های نازکتر پیریت با دانه‌های کوچکتر دارد. کاهش گوگرد و منگنز و افزایش آهن و آرسنیک به سمت کناره‌های بلور پیریت نشان دهنده کاهش شرایط احیایی پیریت از آغاز زمان تشکیل تا پایان آن داشته است. بر این اساس، منگنز باید بصورت سولفیدی بوده باشد.

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.95]



شکل ۸ الف) تغییرات کلی ترکیب پیریت ب)، تغییرات ترکیب از مرکز پیریت به کناره ها پ) تصویر نقاط تجزیه شده بر یکی از نمونه‌های پیریت و ت) و داده‌های XPMA .

جدول ۳ نتیجه تجزیه چند نقطه بر پیریت به روش XPMA.

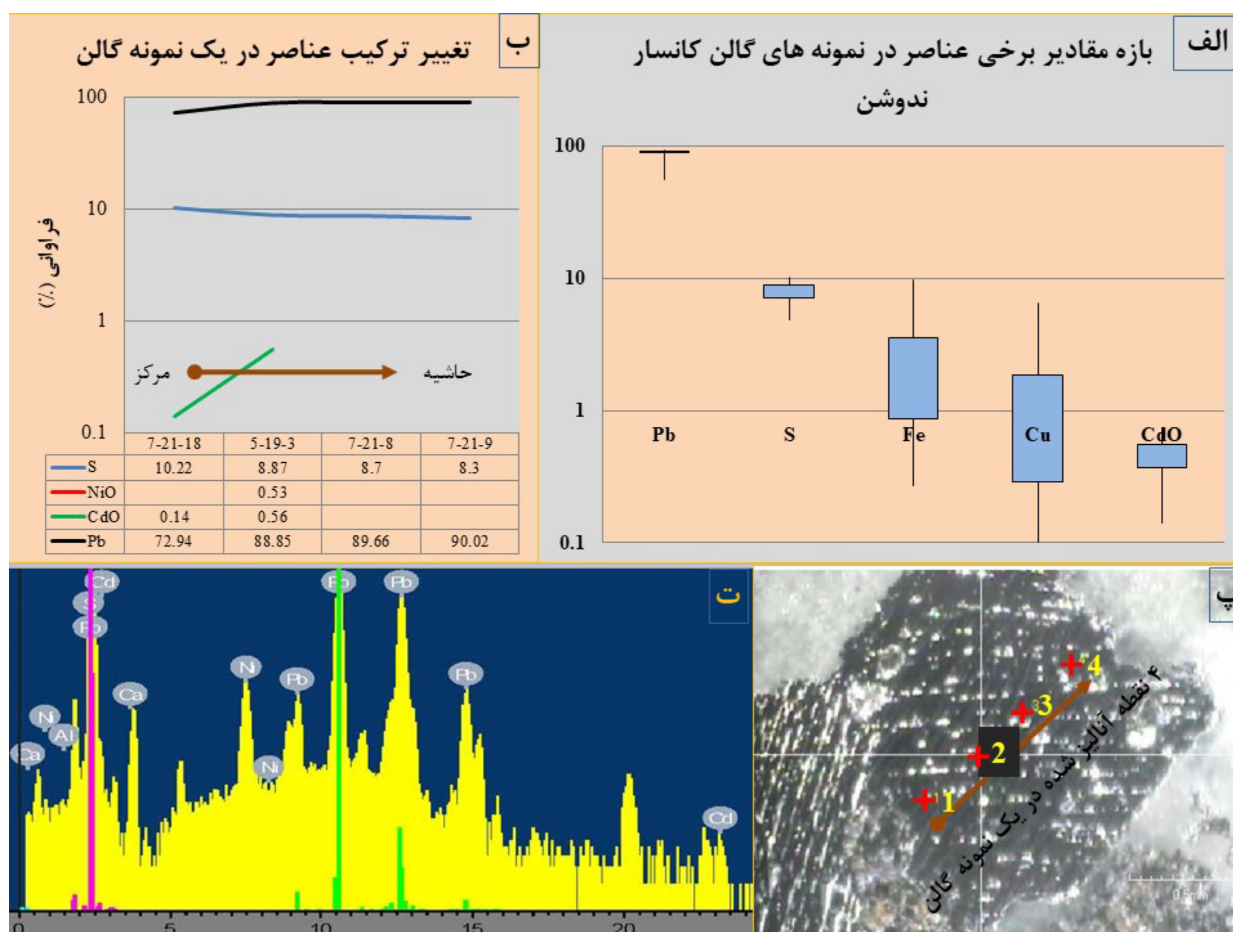
پیریت	S	CaO	Al_2O_3	SiO_2	MnO_2	Fe	As
۵-۳۷-۱	۲۱٫۵۶	۱۳٫۰۹	۰٫۰۵	۰٫۷۴		۴۳٫۴۸	۰٫۱۲
۵-۳۷-۲	۴۳٫۰۷	۳٫۴۳	۰٫۱۳	۱۰٫۳۹	۰٫۱	۳۵٫۵۳	
۵-۳۷-۳	۴۲٫۸	۳٫۴۷		۹٫۵۳	۰٫۱۱	۳۷٫۴۳	۰٫۰۵
۵-۳۷-۶	۴۲٫۵۳	۴٫۴۸	۰٫۱۵	۳۳٫۵۷	۰٫۲۸	۲۵٫۶۶	۰٫۰۳
۵-۳۷-۷	۳۹٫۱۸	۰٫۹۲		۱۳٫۵۱	۰٫۰۷	۳۸٫۴۳	۰٫۰۶
۵-۳۷-۸	۴۲٫۱۴	۶٫۳۱		۳٫۶۹	۱٫۰۳	۲۲٫۹۶	۰٫۱۱

گالن: گالن کانه مهم سرب و دومین کانه اقتصادی فراوان در کانسار است. تمایل تشکیل تأخیری این کانی نسبت به اسفالریت را از فازهای بدام افتاده در گالن می‌توان برداشت کرد. نتایج تجزیه نمونه‌های گالن مناطق مختلف دنیا نشان می‌دهد که این کانی میزبان مناسب عناصر سلنیم، تلوریم، نقره، بیسموت، آنتیموان و گاه تالیم است [۲۴، ۲۵]. بررسی‌های انجام شده نشان از اختلاف متعارف ۱۰٪ در مقدار سرب و گوگرد نسبت به هم در ترکیب گالن دارد [۲۴].

افزون بر عناصر اصلی تشکیل دهنده گالن در کانسار ندوشن، یعنی آهن و مس که با فراوانی بیشتر آشکار شده‌اند، دیگر عناصر با فراوانی کمتر نیکل، کادمیم، کبالت، منگنز، وانادیم و مقدار ناچیزی آرسنیک هستند (جدول ۴). با توجه به

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.95]

شکل ۹ الف، نمونه‌های گالن کانسار ندوشن مس‌دار و آهن‌دار هستند. بیشتر تغییرات مقدار سرب در گستره ۸۸ تا ۹۱٪ جای دارد (۳٪ گستره تغییر) و نشان دهنده خلوص بالای نقاط تجزیه شده است. مقدار گوگرد در مرکز بیشترین است و در لبه تا ۵۰٪ کاهش می‌یابد. از آنجاکه مقدار گوگرد تعیین کننده شدت شرایط احیایی سامانه کانه‌زایی است، بررسی این مقدار در ارتباط با فراوانی عناصر دیگر جالب توجه است. نمونه‌های گالن را می‌توان به انواع کم گوگرد (کمتر از ۷٪) و گوگرد بالا (بیش از ۷٪) دسته‌بندی کرد. وجود نیکل و کادمیم در یک نمونه (KB5-19)، نشان از شرایط احیایی دارد و افزایش مقدار کادمیم و نیکل به سوی مرکز همراه با افزایش مقدار گوگرد تأییدی بر سرشت گوگرددوست و حساسیت این دو عنصر به شرایط اکسایش و احیا (تا بیش از ۱٪ نیکل در مرکز) است. با کاهش مقدار گوگرد، مقدار آهن گالن نیز افزایش می‌یابد. مرز کم گوگرد-گوگرد بالا (۷٪) شاید دارای اهمیت باشد، چراکه در نقاط گوگرد بالا (که آهن ناچیزی دارند)، مس، روی و منگنز یافت می‌شوند. آرسنیک در نقاط دارای ۷٪ گوگرد یافت می‌شود (بیشترین مقدار در نزدیک لبه گالن). نیکل در نمونه‌های کادمیم‌دار وجود داشته و نشان از زمین‌شیمی مشابهی در رقابت برای ترکیب با گوگرد دارد. مقدار اکسید کبالت در نمونه‌های گالن از ۰٫۵ تا بیش از ۱٪ تغییر می‌کند و با بیشترین مقدار مس، آهن و یا آرسنیک همراه است. نکته جالب دیگر در مورد گالن این است که هرچه خطوط برآمده از رخ‌های گالن نمایان باشد، مقدار سرب آن نیز بیشتر است.



شکل ۹ الف) تغییرات کلی ترکیب گالن ب) تغییرات ترکیب از مرکز به کناره‌ها در یکی از نمونه‌های گالن پ)، تصویر نقاط تجزیه شده بر آن و ت) داده‌های XPMA در نقطه ۲.

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.95]

جدول ۴ نتیجه تجزیه چند نقطه بر روی گالن به روش XPMA

گالن	S	CaO	NiO	CdO	Pb	As	Fe
۵-۱۹-۱	۷٫۳۷	۰٫۸۷	۱٫۰۹	۰٫۷۴	۸۹٫۸۲	۰٫۱۲	
۵-۱۹-۲	۶٫۳۷	۰٫۹۵	۰٫۹۷	۰٫۲۹	۹۱٫۴		
۵-۱۹-۳	۸٫۸۷	۱٫۱۸	۰٫۵۳	۰٫۵۶	۸۸٫۸۵		
۵-۱۹-۴	۵٫۳۶	۲٫۹۵		۰٫۳۷	۹۱٫۳۲		
۵-۱۹-۵	۷٫۵۵				۹۰٫۹۸		۰٫۴۷
۵-۱۹-۶	۵٫۲۳				۹۳٫۹۱		۰٫۸۶
۵-۱۹-۷	۵٫۱۹				۹۲٫۱۸	۰٫۲۴	۰٫۸۱

بررسی تغییرات ترکیب از لبه به مرکز گالن نشان می‌دهد که بطور کلی مقدار گوگرد، (و گاه نیکل و کادمیم) به سمت کناره‌ها کاهش و مقدار سرب، کبالت و آهن افزایش می‌یابند. این افت و خیزهای ترکیب نشان از تغییر روند تکوین زمین-شیمیایی سیال کانه‌زا از سیال غنی از نیکل، گوگرد، و کادمیم و تبدیل آن به سیال غنی از آرسنیک، کبالت و وانادیم دارد.

برداشت

کانسار روی-سرب ندوشن نتیجه نفوذ توده گرانیتوییدی در سنگ‌های آتشفشانی اسیدی-حدواسط و آهکی است که کنترل کننده‌های ساختاری (گسل و شکستگی‌ها) در جایگیری ماده معدنی نقش عمده داشته است. همبستگی مثبت فراوانی واخوردگی‌های کالکوپیریت با افزایش مقدار سرب در نمونه‌ها نیز نشان از نقش سیال کانه‌زای تأخیری سرب‌دار در رخداد بیماری کالکوپیریت و جدایش مقدار مس و آهن اسفالریت به صورت میانبار در نتیجه شوک گرمایی از انواع اسفالریت‌های پرآهن (پس از تخلیه بخشی از مقدار آهن در کانسار اسکارن آهن در شمال کانسار چندفلزی) دارد.

با کنارهم نهی تغییر ترکیب نقاط تجزیه شده بر اسفالریت، گالن کالکوپیریت و پیریت، سیر زمین‌شیمیایی سیال‌های گرمابی این کانسار را چنین می‌توان خلاصه کرد: پس از تشکیل کانسار آهن اسکارنی در شمال کانسار چندفلزی ندوشن، با افزایش مقدار روی، کادمیم و منگنز که همراه با افزایش گوگرد بوده است، کانی اسفالریت متبلور شده، بخشی از گوگرد و روی (و نیز کادمیم و آهن و مس) سیال گرمابی را بصورت اسفالریت در شکستگی‌های موجود نهشته کرده است. در پی آن، گالن شکل گرفته و با آغاز خروج چشمگیر سرب از این سیال، خروج گوگرد ادامه یافته است. در این ضمن با کاهش شرایط احیایی، مقدار گوگرد، کادمیم، نیکل و نیز سرب (با توجه به تغییرات از مرکز به کناره) کاهش یافته، مقدار آرسنیک، کبالت و وانادیم افزایش می‌یابد. با تبلور کالکوپیریت، کاهش گوگرد و افزایش آرسنیک در سیال گرمابی ادامه می‌یابد. طی تاریخچه کانی‌سازی کانسار ندوشن پیریت نیز دست کم در دو نسل دیده شده است.

قدردانی

نگارندگان از نظرات و پیشنهادات سازنده داوران محترم مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی سپاسگزاری می‌نمایند.

مراجع

[1] Najafi A., Motevali K., Abdi M., *"Mineral distribution map of Iran",* Geoscience Database of Iran, Geological Survey of Iran (2011).

[2] Heidari S.M., Arefipour S., Hassanlou A., *"Explanatory notes for the mineral deposit types and metallogenic map of Iran",* National Geoscieces Database of Iran (NGDIR), Geological Survey of Iran (GSI) (2017).

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.95]

[13] Yajam S., *"Petrology and geochemistry of plutons in SW Nodushan (Yazd)",* M.Sc. thesis, (2005), Tarbiat Moallem University, in Persian.

[14] Abrishami Keisami H., *"Petrology and geochemistry of volcanic rocks in SW Nodushan, West Yazd",* M.Sc. thesis, (2008), Tarbiat Modarres University, in Persian.

[15] Amanati A., *"Geochemistry of felsic volcanic rocks in SW Nodushan, West Yazd",* M.Sc. thesis, (2010), Tarbiat Modarres University, in Persian.

[16] Etemadi B., Taghipour B., Qobadi A., Eslami A., Salimi Darani M., *"A study on the Petrography and tectonic assemblage of Tertiary igneous rocks inNodushan area (SW Saddough, Yazd province)",* Journal of Petrology, Volume 10 (2012), Pages 13-26, in Persian.

[17] Minook Consulting Engineers, *"Preliminary exploration and geological-mining mapping at Surk iron mine at nodushan, Yazd at the scale of 1:5000",* Ministry of Mines and Industries (1993) , in Persian.

[18] Barati B., Mohammadi B., Borna B., *"Detailed exploration and geological-mining mapping at Nodushan iron district (Yazd province) at the scale of 1:1000",* Geological Survey and Mineral Exploration of Iran (2017), in Persian.

[19] Moore F., Sharifi R., *"Mineral paragenesis as a key for determination of physichochemical condition and skarn temperature: a case study for Mohammadabad, SW Yazd province",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, Volume 1 (2011) Pages 147-160, in Persian.

[20] Etemadi B., Ghobadi A., Taghipour B., *"Geology and the origin of Nodushan clay deposit (SW Saddough, Yazd Province)",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, Volume 1 (2013) Pages 43-56, in Persian.

[21] Berberian M., *"Contribution to the seismotectonics of Iran (Part II), report No.39",* Geological Survey of Iran (1976).

[22] Ramdohr P., *"The ore minerals and their intergrowth",* Pergamon Press (1980).

[23] Barton P.B., Bethke P.M., *"Chalcopyrite disease in sphalerite: Pathology and*

[3] Reichert J., Borg G., Rashidi B., *"Mineralogy of Non-sulphied ore from the Mehdi Abad zinc-lead deposit, Central Iran",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, Volume 2 (2003) Pages 209-217.

[4] Qasemi M., Momenzadeh M., Yaghoubpour A., Mirshokraee A., *"Textural and mineralogical study of Zn-Pb Mehdi Abad deposit",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, Volume 3 (2008) Pages 389-404, in Persian.

[5] Taghizadeh Khajooee N., Sheikhikarizaki H., *"Preliminary exploration of metallic complexes at Nodushan, Yazd"*, (1998), Danesh Zamin Consulting Engineers, in Persian.

[6] Adeli K., Hamedi M.R., Nazari V., *"A summary on the exploration operation at Nodushan polymetallic deposit",* ItokIran Consulting Engineers (2001), in Persian.

[7] Kavoshgaran Consulting Engineers, *"General Explolration in Nodushan polymetallic deposit"* (2010), Geological Survey of Iran, in Persian.

[8] Ghalamghash J., Mohammadiha K., *"Explanatory note of KafeTaghestan geological map, Western Yazd",* Geological Survey of Iran (2005), in Persian.

[9] Aghnabati A., *"Geology of Iran",* Geological Survey of Iran (2006), in Persian.

[10] Taraz A., Aghanabati A., Amidi M., Nabavi M.H., *"Geological map of Abadeh on the scale of 1:250000"*, Geological Survey of Iran (1983).

[11] Yajam S., Aminin S., Ghalamghash J., *"Petrogenesis of apatite-bearing granitic intrusion of Chah-e-Torsh",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, Volume 3 (2008) Pages 425-434, in Persian.

[12] Shahsavari Alavijeh B., Rashidnezhad-Omran N., Corfu F., *"Zircon U-Pb ages and emplacement history of the Nodoushan plutonic complex in the central Urumieh-Dokhtar magmatic belt*", Central Iran: Product of Neotethyan subduction during the Paleogene, Journal of Asian Earth Sciences, 283–295 (2017a).

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.95]

[27] Shahsavari Alavijeh B., Rashidnezhad-Omran N., Ghalamghash J., *"Petrology, Geochemistry and geochronology of Nodoushan intrusive complex: West of Yazd*", Scientific Quarterly Journal, Geosciences, No.105, 215– 232 (2017b).

[28] Tsukimura K., Sato K., Ishihara S., *“Regional and temporal variation in FeS content of sphalerites from Japan and its relation to granitoid series”,* Bulletin of the Geological Survey of Japan, No.5 (1987) pages 227-246.

[29] Barnes H. L., *“Solubilities of ore minerals”.* In: H. L. Barnes (ed.) “Geochemistry of hydrothermal deposits”. John Wiley and Sons (1979).

[30] Ishihara S., *"The magnetite-series and Ilmenite-series granitic rocks*", Minig Geology, No.27, 293-305 (1977).

epidemiology”, American Mineralogist, Volume 72 (1987) pages 451-467.

[24] Craig R.J., Vaughan D.J., *“compositional and textural variations of the major iron and base-metal sulfide minerals”* in: Sulphide deposits-their origin and processing, Editorial committee P.M.J.Gray, G.J.Bowyer, J.F.Castle, D.J.Vaughan, N.A.Warner, The institution of mining and metallurgy (1990).

[25] Burnham C.W., *“Metallogenic provinces of the southwestern United States and Northern Mexico”,* Ph.D. thesis, California Institute of Technology (1955).

[26] Pearce C.I., Pattrick R.A.D., Vaughan D.J., in: Vaughan D.J., 2006, Reviews in mineralogy and geochemistry Volume 61, *“Sulfide mineralogy and geochemistry”,* Geochemical Society and Mineralogical Society of America (2006).

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.95]